

Sensibilidad de las variaciones en el campo de deformaciones en función de la aparición de daños en palas de aerogeneradores fabricadas en materiales compuestos.

J. Sierra,

Facultad de Ingeniería Aeronáutica, Grupo de Investigación en Ingeniería Aeroespacial,
Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia

A. Güemes,

Departamento de Materiales y Producción Aeroespacial, Universidad Politécnica de
Madrid, España

M. Gómez

Simulación y Sistemas Logísticos, INDRA, España.

RESUMEN

Se instrumentó un prototipo de pala de aerogenerador de 150 kW de 13 metros de longitud con 24 FBGs embebidas directamente en el material durante la fabricación. Posteriormente se realizaron mediciones de deformaciones en el prototipo de pala sin ningún daño, con el fin de determinar el *baseline* de la pala. Luego, se indujeron algunos daños artificiales de diferentes naturalezas y severidades con el fin de estudiar la susceptibilidad de la aparición de cambios en el campo de deformaciones y la rigidez global de la pala, en función de la aparición de dichos daños. Se realizó un estudio de esfuerzos diferenciales con el fin de determinar la variación de la rigidez en la estructura y determinar si los sensores embebidos eran capaces de detectar dicha variación. Los resultados se presentan en este artículo.

PALABRAS CLAVE: Campo de deformaciones, esfuerzos diferenciales, FBG, daños, palas, aerogeneradores.

1. INTRODUCCIÓN

A medida que la complejidad de las estructuras incrementa, también lo hacen los modelos físicos y/o matemáticos que describen dichas estructuras, así como las técnicas que permiten garantizar la integridad estructural durante la vida en servicio. En la actualidad diversas técnicas de SHM (*Structural Health Monitoring*) que permitan determinar si una estructura ha sufrido daños en una etapa incipiente, están siendo desarrolladas por diversos grupos de investigación alrededor del mundo. Una de las técnicas propuestas consiste en detectar sutiles cambios en el campo de deformaciones, estudiando directamente las correlaciones existentes entre diferentes parejas de sensores. Esta técnica se enmarca dentro de la corriente filosófica de SHM que emplea datos experimentales en lugar de modelos determinísticos (como la matriz de rigidez o parámetros modales, entre otros). Los datos experimentales son empleados para

“entrenamiento” o “aprendizaje” de diferentes tipos de algoritmos. La técnica ha recibido el nombre de “reconocimiento de patrones”. Los autores han trabajado durante los últimos años en el desarrollo de dichas técnicas con el fin de predecir la aparición de daños en estructuras complejas fabricadas en materiales compuestos. Con el fin de realizar una reducción dimensional de los datos experimentales, así como filtrar datos redundantes o simplemente inútiles, una técnica estadística llamada PCA se ha adaptado al reconocimiento de patrones. [1], [2], [3], [4].

Sin importar la metodología empleada para analizar la información, la técnica se fundamenta en un principio físico simple: el cambio en el campo de deformaciones local y de la rigidez local/global de una estructura debido a la aparición de daños. Antes de aplicar diferentes técnicas de reconocimiento de patrones en un problema específico es importante estudiar si en la estructura de interés, daños típicos de una severidad similar a los esperados durante la operación real del componente, alteran lo suficiente el campo de deformaciones local como para que dichas alteraciones sean detectables con la metodología propuesta. [3].

Una forma simple de realizar dicha comprobación consiste en estudiar el comportamiento de diferentes parejas de sensores de deformación adheridos o embebidos en la estructura. Esta técnica ha recibido el nombre de esfuerzos diferenciales. Un daño provoca un cambio en la rigidez global y, para diferentes cargas aplicadas, un cambio en el campo de deformaciones local. Por lo tanto, las relaciones entre las deformaciones medidas entre dos sensores cambian en presencia de un daño debido al cambio en la distribución de los esfuerzos. [4].

El objeto de este estudio consiste en mostrar el sistema implementado en el que se emplean redes de Bragg (FBGs) como sensores de deformación, directamente embebidos en la pala durante su fabricación, permite identificar cambios en la rigidez local/global de la estructura, como consecuencia de la aparición de diferentes tipos de daños inducidos en la pala. [5].

2. MONTAJE EXPERIMENTAL

Luego de desarrollar una metodología que permitiese embeber las FBGs directamente en la pala durante su proceso de fabricación y de sortear las diferentes dificultades inherentes a la técnica empleada para fabricar la pala (RTM light), se fabricó un prototipo de pala con el sistema de monitorización integrado. Se embebieron 4 fibras ópticas, cada una provista de 6 FBGs separadas 2 metros. Se embebieron 2 fibras en el intradós de la pala y dos en el extradós, ubicadas al 20% y al 80% de la cuerda. La fibra óptica correspondiente al canal 1 (CH1) se ubicó en el borde de ataque del extradós, la correspondiente al canal 2 (CH2), en el borde de ataque del intradós, la correspondiente al canal 3 (CH3), en el borde de salida del extradós y, finalmente, la correspondiente al canal 4 (CH4), en el borde de salida del intradós. Los 4 primeros sensores se posicionaron a 2 metros de la raíz de la pala.

Se llevó a cabo un ensayo para evaluar y validar la funcionalidad del sistema de monitorización instalado. Para el ensayo, se apoyó la pala en la raíz y en la punta, de modo que se obtuvo un caso de flexión a dos puntos con apoyos simples (no

empotrados). Luego, se aplicó carga a la pala en condiciones indemnes, es decir, sin ningún daño artificial inducido. Para ello se emplearon sacos de arena que se apilaron en el centro de la pala (ver la figura 1). Se utilizaron 4 magnitudes de carga diferentes (150, 200, 250 y 300 kilogramos). Posteriormente se indujeron 8 daños artificiales de diferentes tamaños y naturalezas, ubicados en diferentes zonas de la pala y se realizaron las mismas mediciones que las realizadas con anterioridad. Para interrogar la fibra óptica se empleó un equipo Micron Optics SM130.

Se indujeron 3 tipos de daño diferentes. El primer tipo de daño consistió en impactos con un mazo en el borde de ataque o en el borde de salida. El primer daño (D1) se indujo en el borde de ataque en medio de los sensores 2 y 3. El impacto tuvo una energía de aproximadamente 300 J. El segundo daño (D2) se indujo en medio de los sensores 3 y 4 en el borde de ataque. El tercer daño (D3) se indujo entre los sensores 2 y 3 en el borde de salida. Estos dos últimos con una energía de aproximadamente 100 J. También se propinó un impacto en la zona correspondiente al *cap* (larguero central de la pala) entre los sensores 2 y 3 (D7), de aproximadamente 100 J. La energía de impacto empleada es baja si se compara con el impacto de un pato de 2 kg volando a 120 km/h que asciende a un poco más de 1000 J.

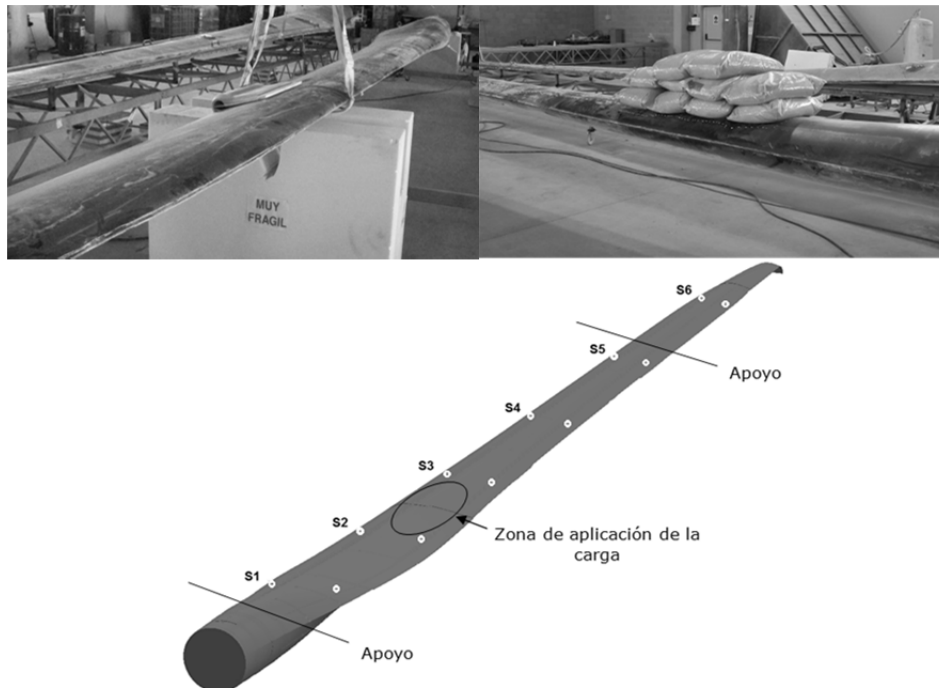


Fig. 1. Montaje experimental. Superior derecha: detalle de los apoyos. Superior izquierda: detalle de la introducción de carga. Inferior: detalle de las posiciones de los sensores (S1 a S6), los apoyos y la zona de introducción de carga.

El segundo tipo de daño consistió en inducir un despegue en borde de fuga entre los sensores 3 y 4. Debido a que la pala no se fabricó empleando adhesivos, una forma de

emular los despegues consistió en realizar un corte longitudinal, forzando la delaminación de las capas justo en el borde de salida, de manera que se separaran las telas en una zona específica. Se partió de una longitud inicial de 10 centímetros (D4) y se culminó en una longitud de 40 centímetros (D5).

El tercer y último tipo de daño, consistió en agujeros de 40 mm de diámetro en diferentes posiciones de la pala. El primer agujero (D6) se realizó entre la línea de sensores 1 y 2, a 50 cm de la línea de sensores 2 y a 10 cm del borde de ataque. Este orificio cortó por completo la piel de la pala. El segundo taladro (D8) se realizó sobre el *cap*, justo en la posición donde se había inducido el daño por impacto D7. En este caso, se cortó por completo la piel de la pala pero solo se cortó el *cap* superficialmente (cerca de 1 cm).

Para cada magnitud de carga empleada y para cada uno de los diferentes daños, cada medición se llevó a cabo 5 veces con el fin de obtener suficiente información para realizar inferencia estadística y descartar datos atípicos de ser necesario.

A continuación se presentan algunos ejemplos de las curvas de deformación versus deformación para algunas parejas de sensores que exhiben el comportamiento que se desea poner en evidencia. En los resultados presentados se empleó el promedio de los 5 experimentos realizados.

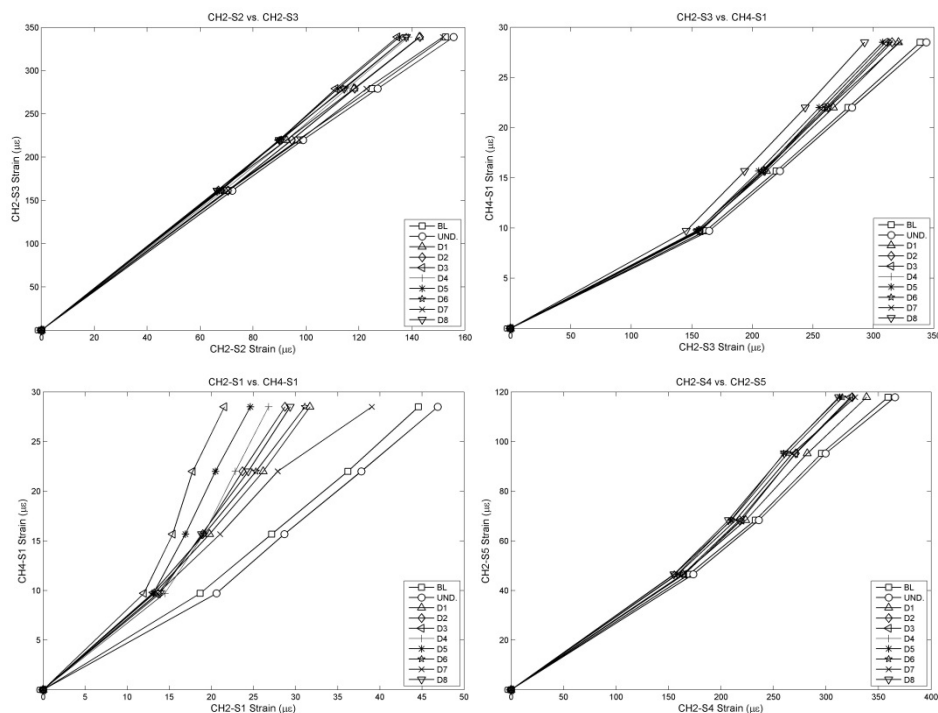


Fig. 2. Ejemplos de resultados experimentales obtenidos. Curvas deformación vs. Deformación para diferentes parejas de sensores.

Como se puede apreciar en las cuatro figuras anteriores (que son solo unos pocos ejemplos de las diferentes combinaciones de parejas de sensores posibles), existe una clara diferencia en la rigidez entre las parejas de sensores presentadas en función de la aparición de daños en la pala. Al graficar las deformaciones de un sensor en función de las deformaciones de otro sensor, se puede apreciar como la pendiente de la curva cambia cuando se han inducido daños en la pala. Este comportamiento indica que el campo de deformaciones local y por ende, la rigidez local, han sufrido alteraciones como producto de una redistribución de las cargas en la estructura propiciada por la aparición de discontinuidades (daños).

En la Figura 2, en la parte superior izquierda, se aprecia la curva de esfuerzos diferenciales para la combinación de los sensores CH2-S2 y CH2-S3. Esta pareja de sensores se encuentra ubicada en la zona donde se impartió la mayor cantidad de daños en el prototipo empleado, sin embargo, y como puede apreciarse en las demás figuras presentadas, los cambios más representativos en la rigidez local no necesariamente ocurren en dicha zona cercana a la mayor concentración de daños.

En la zona inferior izquierda, se presenta la curva de esfuerzos diferenciales para la pareja de sensores CH2-S1 y CH4-S1. Esta pareja de sensores se encuentra cerca al apoyo de la raíz y a 3 metros de los daños D1, D3, D6, D7 y D8. No obstante, y como se puede observar, el cambio en la rigidez local en esta zona es mayor que en la zona donde se indujo la mayor cantidad de daños. Un ejemplo del cambio en la rigidez local en zonas lejanas al daño (cercanas a la punta de la pala) se presenta en la zona inferior derecha de la Figura 2. En esta zona se aprecia la curva de esfuerzos diferenciales para la pareja de sensores CH2-S4 y CH2-S5. Nuevamente, el cambio en la rigidez local es considerable y más evidente a simple vista que en la zona circundante al daño. Este comportamiento se puede atribuir a la naturaleza de la pala; al tratarse de una geometría compleja, fabricada mediante laminados de diversas configuraciones y al emplear diferentes tipos de tejidos de fibra de vidrio con el fin de reforzar localmente regiones específicas de la pala, la aparición de un daño local causa una redistribución global de los esfuerzos en la pala, que se ve reflejada en las diferentes correlaciones existentes entre los sensores embebidos en la pala.

El punto importante a remarcar es que este experimento demuestra que el sistema de detección implementado en la pala funciona y está en capacidad de detectar cambios en la rigidez de la estructura correlacionando las medidas de deformación obtenidas a partir de FBGs embebidas en la pala durante la fabricación de la misma.

3. CONCLUSIONES

Se diseñó, fabricó y probó un sistema de monitorización de deformaciones basado en el uso de redes de Bragg que fuese directamente embebido en una pala de aerogenerador fabricada mediante una innovadora técnica de manufactura que implica el uso de un molde cerrado con todos los inconvenientes que ello conlleva para embeber las fibras ópticas.

Los sensores de fibra óptica soportaron adecuadamente el proceso de fabricación de la pala y la mayoría de ellos quedaron embebidos correctamente en la pala.

Si bien el caso de carga empleado no se corresponde con ninguno de los casos de carga reales que experimenta una pala durante su operación en condiciones reales, permite someter la estructura a niveles de deformación razonables (desde el punto de vista de la relación señal/ruido) para, de esta manera, estudiar la sensibilidad de las variaciones en el campo de deformaciones en función de la aparición de daños inducidos en la pala con la que se realizaron los experimentos.

Es posible apreciar en las diferentes curvas deformación versus deformación para diferentes parejas de sensores, como la pendiente cambia en función de la aparición de daños. No obstante, no se debe realizar ninguna inferencia a priori basándose en si la pendiente aumenta o disminuye, si la magnitud aumenta un determinado número de veces, etc.; ya que, como se mencionó previamente, en primer lugar, el daño tuvo un carácter acumulativo y en segundo lugar, cada daño modifica de una forma particular la distribución de las cargas en la estructura y por ende, el campo de deformaciones local/global.

Se comprobó que el sistema mide adecuadamente las deformaciones y que los cambios en el campo de deformaciones y la rigidez global de la estructura, producidos por la aparición de los daños, son detectables mediante la técnica de los esfuerzos diferenciales. Esto valida la realización de un estudio más profundo mediante técnicas de reconocimiento de patrones como PCA.

REFERENCIAS

- [1] L. Mujica, J. Rodellar, A. Fernandez y A. Güemes, «Q-statistic and T2-statistic PCA-based measures for damage assessment in structures,» *Structural Health Monitoring*, pp. 1-15, 2010.
- [2] I. Lopez y N. Sarigul-Klijn, «A review of uncertainty in flight vehicle structural damage monitoring, diagnosis and control: challenges and opportunities,» *Progress in aerospace sciences*, vol. 46, pp. 247-273, 2010.
- [3] D. E. Adams, Health monitoring of structural materials and components, Lafayette: Jhon Wiley & Sons, 2007.
- [4] J. Holnicki-Szulc, Smart technologies for safety engineering, Warsaw: Jhon Wiley & Sons, 2008.
- [5] J. Sierra, A. Güemes y L. E. Mujica, «Damage detection by using FBGs and strain field pattern recognition techniques,» *Smart materials and structures*, vol. 22, pp. 1-10, 2013.
- [6] A. Fernández, J. Menendez y A. Güemes, «Damage detection in a stiffened curved plate by measuring differential strains,» de *Internatiuonal conference on composite materials*, Kyoto, 2007.
- [7] A. Güemes y J. Sierra, «Fiber optic sensors,» de *New trends in structural health monitoring*, Udine, Springer, 2013, pp. 265-316.